昆虫学报 *Acta Entomologica Sinica*，December 2003，46（6）：732－738 ISSN 0454-6296

粘虫成虫在气流场中飞行行为的观察研究

尹 姣，封洪强，程登发，曹雅忠*
（中国农业科学院植物保护研究所，北京 100094）

摘要：通过改进悬吊测飞技术、室内风洞和野外雷达相结合的观测方法，研究了粘虫在气流场中的飞行行为特征及其与气流的关系。直筒风洞自由飞行观测的结果表明，粘虫蛾对气流有明显行为反应，表现为头部迎风起飞和迎风飞行的特性；在3.0～5.5 m/s风速下，有92%～94%的个体可一次逆风飞行通过2 m长的风洞；当风速≥6.0 m/s时，有71.9%的蛾子沿螺旋状的飞行轨迹逆风通过风洞。环形风洞悬吊飞行测试的结果表明，粘虫可逆风飞行的最大风速为7.2 m/s；在风速≤4 m/s条件下，90%以上个体头部迎风飞行或头部朝向与风向成一定的夹角，侧逆风飞行。雷达观测发现粘虫在空中迁飞过程中具有成层现象，并有较强的秋季回迁定向行为，其头部总是朝向西南；迁飞的最终位移与风向及风速大小有关，迁飞位移速度是飞行速度与风速的矢量和。

关键词：粘虫；飞行行为；风洞；雷达；气流
中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296（2003）06-0732-07

Observations on the flight behavior of the oriental armyworm，*Mythimna separata*（Walker）in airflow

YIN Jiao，FENG Hong-Qiang，CHENG Deng-Fa，CAO Ya-Zhong*（Institute of Plant Protection，Chinese Academy of Agricultural Sciences，Beijing 100094，China）

Abstract：Flight behavior of the oriental armyworm *Mythimna separata*（Walker）moth in airflow was studied systematically using wind tunnel and scanning entomological radar. The results showed that the moths responded obviously to wind in the cylindrical wind tunnel，and they took off and flew against airflow in flight. When the wind speed was 3.0～5.5 m/s，up to 92%～94% moths tested could fly through the 2-meter wind tunnel；while，only 71.9% tested moths flew helically through the cylindrical wind tunnel against airflow when the wind speed reached to or over 6.0 m/s. In the annular wind tunnel，their maximum flight speed was 7.2 m/s；more than 90% of the tested moths flew with certain angle against airflow when the wind speed was or over 4.0 m/s. Radar observations indicated that the stratification occurred in the course of the Oriental armyworm migration. The moths headed southwest in autumn migration. The flight displacement of the moths was related to wind direction and speed.

Key words：*Mythimna separata*；flight behavior；wind tunnel；radar；airflow

粘虫 *Mythimna separata*（Walker）是一种典型的迁飞害虫，在我国，粘虫的远距离迁飞为害规律早已通过田间标记回收试验得到证实（李光博等，1964）。在此基础上，利用昆虫飞行测试系统对粘虫的飞行生物学进行了相关研究，初步探讨了粘虫飞行潜力，飞行与蛾龄、营养、温度、光照及气流等因子的关系（张志涛和李光博，1985；曹雅忠等，1991）。近年来，对粘虫迁飞起飞阶段的生理、生态学机制研究取得显著进展，进一步明确了幼虫密度、幼虫期营养以及湿度和光周期等环境条件对粘虫飞行活动的影响（罗礼智等，1995a；曹雅忠等，1995a，1996，1997），粘虫飞行与产卵的关系（罗礼智等，1995b，1998，1999），粘虫飞行的能源物质及其消耗（曹雅忠等，1995b），粘虫蛾飞行肌超微结构以及飞行肌降解与繁殖的关系（罗礼智等，1996；李克斌等，2001）等生理生态特征。昆

基金项目：国家重点基础研究发展规划项目“973”（G2000016206）；国家科技攻关项目（2001BA509B01）；社会公益研究专项资金项目（2001DIA0012）
作者简介：尹姣，女，1976年2月生，硕士，研究方向为昆虫生态学，E-mail：ajiaozi@163.com
* 通讯作者 Author for correspondence，E-mail：yazhongcao@sina.com
收稿日期 Received：2003-03-19；接受日期 Accepted：2003-09-08

虫的迁飞运转过程是迁飞活动的重要环节之一。昆虫的迁飞由于是在高空气流场中进行的，因而涉及许多复杂多变的环境因子和昆虫内在因素。国外已应用昆虫雷达较成功地研究了非洲粘虫 *Spodotera exempta*，沙漠蝗 *Schistocerca gregaria*，澳大利亚蝗 *Chortoicetes terminfera*，棕色卷蛾 *Choristoneura fumiferana* 和稻褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 等昆虫迁飞与气象因子关系的规律（Schaefer，1976；Riley *et al*.，1979，1983；Drake，1982）。我国在 20 世纪 80 年代，利用雷达开展了粘虫迁飞规律的相关研究，观测了粘虫降落和起飞阶段的一些行为特征，初步明确了其迁飞与高空气流存在一定的联系（陈瑞鹿等，1988；Chen *et al*.，1989）。但由于受当时雷达观测设备与技术的局限性，难以直接观测和记录粘虫迁飞个体的运动方向和气流方向的关系，并缺乏不同迁飞高度风、温场的同步观测数据。赖凤香等（2000）利用自制的昆虫飞行实验直筒风洞，观测了在风洞条件下粘虫在不同流速气流中的起飞与飞行行为，以及不同流速气流下的飞行运动轨迹等，但由于其直筒风洞较短（1 m），特别是无法测定试虫位移速度、虫体方向与气流方向的夹角等关键参数，因此尚不能较全面地解析粘虫飞行与气流的关系。我们采用直筒风洞与环形风洞相结合，并改进悬吊测飞的方法，在室内观测粘虫飞行行为特征及其与气流的关系；同时，利用雷达装置在野外观察田间自然种群粘虫迁飞与气流的关系；通过不同设备和观测方法的结合与互补，以全面解析和掌握粘虫在气流场中的飞行行为特征及其迁飞与气流的关系。

1　材料与方法

1.1　试虫

室内种群：试验用虫来自 2000 年 5 月在河南郑州郊区采集的田间种群，在室内饲养繁殖后用于本实验。室内粘虫饲养采用玉米和小麦苗群体饲喂幼虫；成虫羽化后用 10%蜂蜜液群体饲养至 3 或 4 日龄蛾供试验选用。幼虫和成虫的饲养条件均为（25±1）℃，RH 60%～70%。

自然种群：在河北廊坊的田间，利用雷达观测的粘虫为野外自然生长的种群。

1.2　仪器设备

室内观测采用自制的直筒风洞和环形风洞，直筒风洞有效实验空间为 ϕ65 cm×200 cm；环形风洞的有效实验空间为 6 cm×10 cm×100 cm。分别用电风扇和吹风机向直筒风洞和环形风洞提供实验气流，利用接触调压器双向无级调速；采用电子风速仪标定气流速度，处理误差±0.1 m/s。

田间观测所用雷达为无锡海星雷达有限公司组装的 KC-2 昆虫扫描雷达。该雷达由日本产 RA-722UA 主机及发射系统加国产 711 气象雷达天线改装而成。雷达波长为 3.2 cm，发射频率为 9.4 GHz，天线方位最大转速为 8 r/min。

1.3　风洞测试

在室内条件（25℃±1℃，RH 60%～70%）下，采用直筒风洞和环形风洞相结合的观测方法。利用直筒风洞主要观测粘虫在不同气流速度下的起飞和飞行行为特征等，设 1～2，3～4，4.5～5.5 和 ≥6.0 m/s 等 4 个气流梯度；试虫从风洞壁上开的小孔自然进入风洞，观测其自由起飞和飞行活动。利用环形风洞主要观测粘虫在气流场中的飞行速度、顺风和逆风飞行的虫体飞行姿态及其与风向的夹角等；测试时选取有代表性的成虫，试虫用 502 胶粘以 ϕ0.2 mm 细铜丝后联接在飞行磨的悬臂端部，进行悬吊飞行（图 1）。为了观测粘虫在悬吊飞行条件下的自主调控飞行方向和行为，设计了试虫在飞行磨悬臂端部可自由（旋转）选择飞行方向的吊环；改进后的悬吊测飞方法，即可使试虫自由选择飞行方向，也可人为固定其飞行方向。

1.4　雷达观测

2001 年 8 月在中国农科院廊坊基地（39°30′42″N，116°36″07″E，28 m asl）利用雷达观测粘虫在空中迁飞运转的高度、飞行行为与风、温场的关系。雷达观测采用 Drake（1981）设计的 3°，5°，8°，12°，18°，28°，45°和 58°序列仰角观测法，观测数据的采集与分析采用 Cheng 等（2002）设计的计算机自动数据采集与分析系统进行采集并贮存于光盘上，该数据采集系统可通过红蓝绿三色确定昆虫飞行位移的方向；并根据 Drake（1981）计数法进行昆虫数量的半自动分析。雷达观测每天自日落时始至日出时止。地面以上 3 000 m 以下的温度采用探空气球携带的无线探空仪测得，每升高 8.33 m 记录一次数据。用经纬仪跟踪气球每 30 s 记录一次气球的方位和仰角，并据此计算出每 50 m 的平均风速与风向。低空探测每日一次。并在地面利用高空探照灯作光源，诱集和检测空中昆虫的种类及其种群密度，以此提高雷达观测数据的准确性。

2 结果与分析

2.1 室内观测

2.1.1 在直筒风洞中的起飞和飞行行为：利用直筒风洞观测粘虫在不同速度气流中的起飞和飞行行为的结果表明（表 1），粘虫对气流具有明显的感知反应，尽管试虫从放虫孔进入风洞时头部的朝向是随机的，但在进入风洞后无论头部是迎风还是顺风均未立即起飞，而是首先表现为体和翅的震颤，同时不断调整虫体方向，在找到适宜的方向后才举翅起飞。微风时，尽管会有少数个体起飞方向与风向相同，但是有 87.8% 的个体头部逆风起飞和 95.9% 的个体头部迎风飞行；当风速大于 3.0 m/s 时，所有试虫均表现为头部迎风起飞；在 3.0 ~5.5 m/s 风速内试虫均表现为头部迎风飞行，并有 92% ~ 94% 的个体可逆风一次飞行通过 2 m 长的风洞；当风速在 6.0 m/s 或以上时，有 71.9% 的试蛾虫体方向与气流形成一定夹角（30°以内），呈“Z”形或螺旋式的逆风位移，头部依然保持侧迎风状态，并在此风速下通过 2 m 长的风洞；但也有 28.1% 的个体只能短暂逆风飞行，数分钟后便随风位移（头部朝向气流）。

表 1 粘虫蛾（4 日龄）在直筒风洞中的起飞与飞行行为

Table 1 Flight behavior of the armyworm moth *Mythimna separata* in the cylindrical wind tunnel

风速 Wind speed (m/s)	供试虫数（头） Number of moths tested	起飞方向（头） Individuals taking off in different directions		飞行位移方向（头） Individuals with displacement in different directions	
		逆风 Upwind	顺风 Downwind	顺风 Downwind	逆风 Upwind
1 ~ 2	49	43	6	2	47
3 ~ 4	48	48	0	3	45
4.5 ~ 5.5	51	51	0	7	47
≥6.0	57	57	0	16	41

2.1.2 在环形风洞中的飞行特征：利用环形风洞和悬吊飞行磨测试了粘虫蛾在气流中的飞行行为、顺风和逆风条件下的虫体方向与风向的夹角。在固定飞行方向条件下的测定结果表明，粘虫的飞行速度有随风速大小而变化的现象；在逆风测试中，粘虫随风速的提高而振翅频率加快，在测试的 13 头蛾子中有 8 头逆风飞行的瞬时速度超过 6 m/s，其中 1 头逆风飞行的最大风速达到 7.2 m/s，此时蛾子的飞行位移为零，但持续的时间不长，数分钟后便随风位移；在顺风情况下，10 头试虫均表现出自身飞行速度随风速增加而下降的行为；上述现象与张志涛和李光博（1985）的试验结果相同。

在此基础上，观测了在风速小于 7.2 m/s（逆风飞行临界值）条件下的粘虫逆风飞行状态（表 2），4、5 日龄粘虫蛾在相同或不同风速下能够持续飞行的位移速度和距离略有不同，5 日龄蛾在风速为 2.7 m/s 的逆风条件下其个体最大飞行位移速度为 3.7 m/s，平均飞行位移距离（即实际位移）亦最远；而随着风速的加大，4、5 日龄蛾的飞行位移速度和飞行位移距离均随之减缓或缩短；另外还发现，虽然粘虫蛾抗逆风飞行能力较强，但个体间存在较大差异。

表 2 粘虫在环形风洞中不同逆风风速下的飞行情况

Table 2 Flight of the armyworm moth *Mythimna separata* in different speeds of upwind in the annular wind tunnel

风速 Wind speed (m/s)	供试蛾 Moths tested		位移速度 Speed of displacement (m/s)		位移 Displacement (m)
	日龄 Age (day)	虫数（头） Number	最大 Maximum	平均 Mean	
2.7	4th	16	2.4	0.97 ± 0.24 b	480.0 ± 99.7 c
	5th	16	3.71.46 ± 0.40 a	1 831.0 ± 310.2 a	
4.0	4th	16	1.30.65 ± 0.17 c	379.0 ± 81.1 d	
	5th	16	2.1	0.56 ± 0.24 cd	810.0 ± 167.4 b
6.7	4th	16	0.8	0.32 ± 0.10 e	9.3 ± 3.4 f
	5th	16	1.3	0.51 ± 0.15 d	29.0 ± 10.6 e

注 Note：表中数据是平均值 ± 标准误，对位移和位移速度的数据分别进行了 Lg 和 1 + Lg 转换后各用不同字母表示差异显著（$P \leq 0.05$）。The data in the table are mean ± *SE* and those followed log different letters indicated significant difference (Duncan's multiple range test after Lg and 1 + Lg transformation, $P \leq 0.05$).

在可自由调整飞行方向的测试中发现，粘虫蛾仍表现有头部迎风起飞和迎风飞行的习性，并随风速变化自动调整虫体方向与风向的夹角：在风速≤4 m/s 时，90%以上个体迎风飞行或头部朝向与风向形成 15°～30°的夹角逆风位移（图 1），但随着风速的逐渐加大，该夹角稍有加大；当风速突然加大时，蛾子会猛然掉头飞行；在风速加大超过 6 m/s 或超过可逆飞临界风速时，粘虫逆风飞行一段时间之后则顺风位移（其中 60%以上的个体表现为头部迎风或侧迎风姿态，30%以上的个体则为头部顺风姿态）。

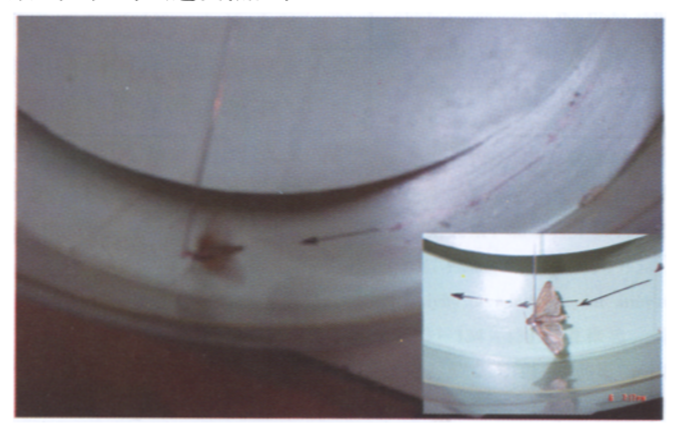


图 1　粘虫蛾在环形风洞内飞行情况

Fig.1　An armyworm moth flying in the annular wind tunnel

2.2　田间雷达观测结果

在廊坊基地用雷达直接观测粘虫迁飞活动的结果表明，粘虫在空中迁飞具有成层现象（图 2）。粘虫迁飞的最高高度可达 2.3 km，迁飞聚集在不同高度上形成三层。第一层出现在 500 m 以下的逆温层，此层内温度高于地面温度，峰值为 26.6℃，出现在 125 m 左右，高出地面温度约 4℃；此层风速的峰值出现在 200～400 m 高度，最大值为 10 m/s；粘虫的最高密度出现在 250 m 左右，温度为 25℃左右，可见昆虫在适温区内迁飞时成层与风速有关。第二层出现在 750～1 300 m，峰值出现在 900 m；在此层内无明显逆温出现，风在 750 m 和 1 300 m 处各出现一很强的切变，风向由 SSW 转为 ENE，风速分别达到 15.5 和 13.5 m/s 的极值；昆虫密度的峰值出现在 1 000 m 左右，此处的风速达到最小，风向为 SW，温度为 20℃左右。第三层出现在 1 300～2 000 m，峰值出现在 1 500（1 350～1 550）m 左右，此高度处的风速达到最小值，方向为 SW，温度为 17℃左右。

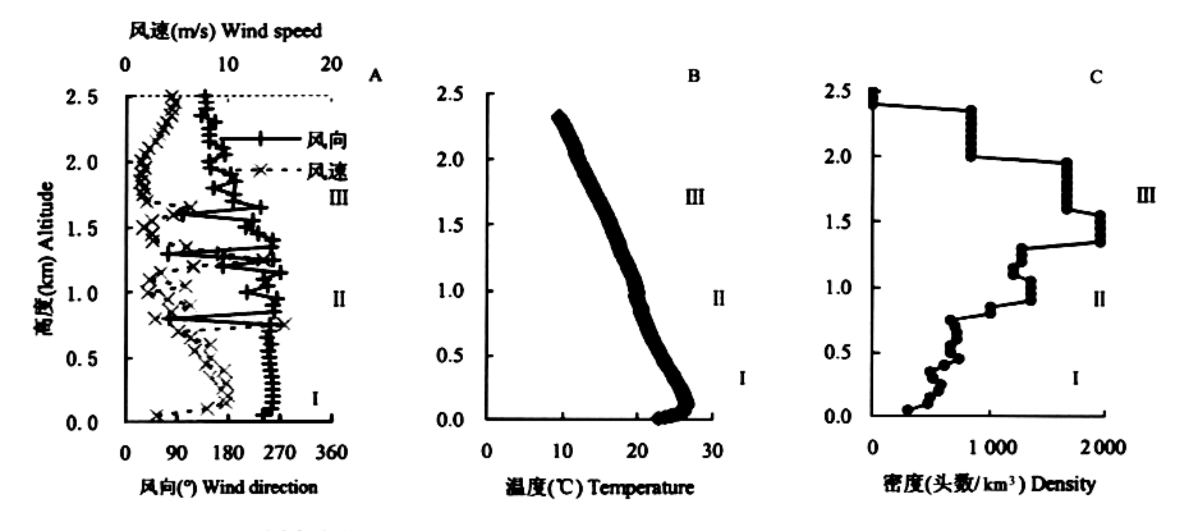


图 2　不同高度的风（A）、温（B）场和迁飞粘虫蛾密度（C）廓线（2001.8.30）

Fig.2　Profiles of wind (A), temperature (B) and moth densities (C) of *Mythimna separata* migrating at different altitudes (Aug. 30, 2001)

高度 Altitude：Ⅰ：<500 m；Ⅱ：750～1 300 m；Ⅲ：1 300～2 000 m

粘虫蛾在空中的位移定向可以通过连续3次回波扫描的颜色记录以及位移与风速的矢量差计算出来，粘虫蛾在不同飞行高度上的位移与定向分布如图3所示。在第一层与第三层内粘虫头部侧逆风飞行，在第二层内粘虫头部方向与风向近于垂直；不论风向和高度如何变化，粘虫头部总是向西南定向。但是总体来看，迁飞的位移速度和方向与风向及风速大小紧密相关，迁飞位移速度是粘虫飞行速度与风速的矢量和。

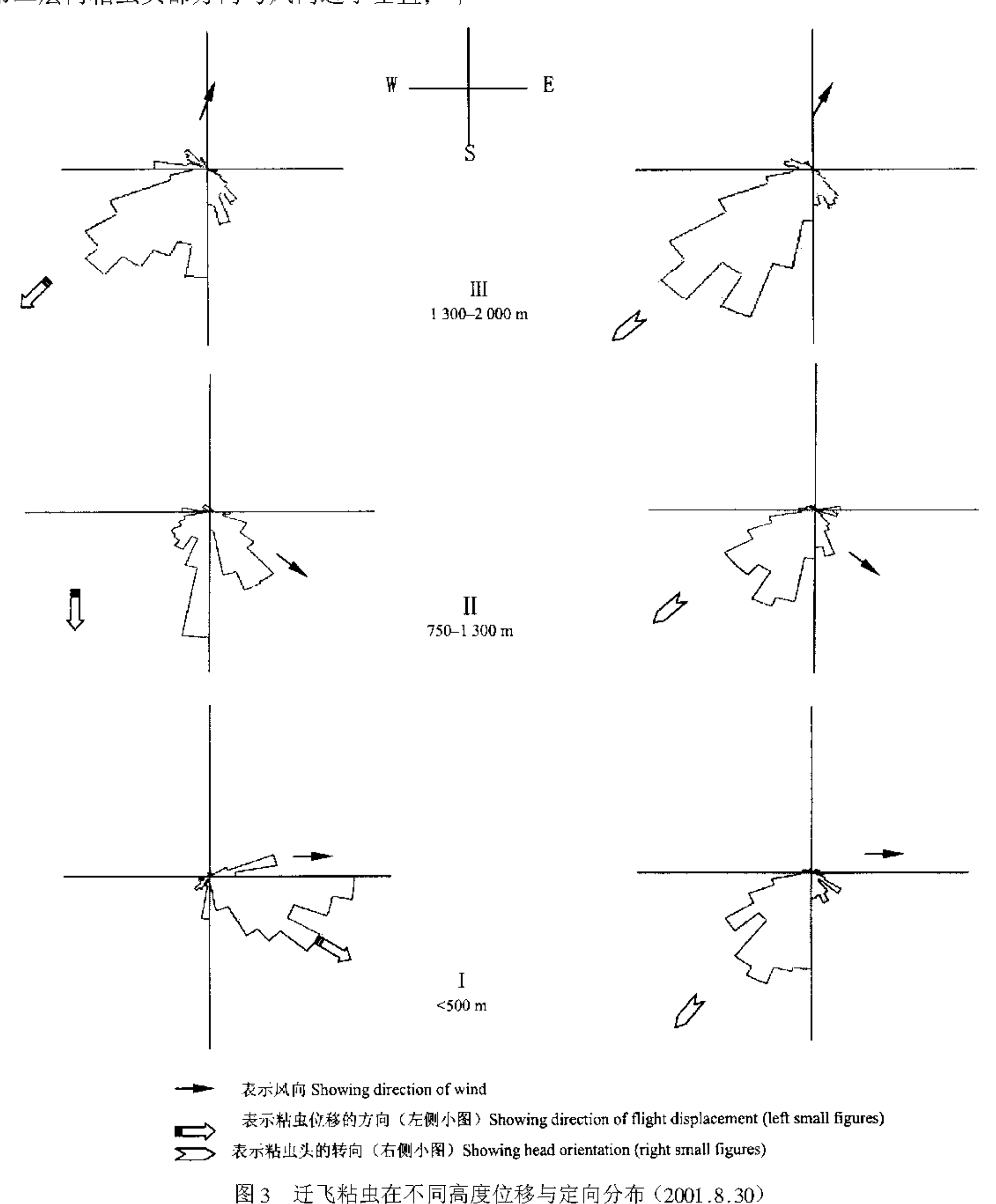


图3 迁飞粘虫在不同高度位移与定向分布（2001.8.30）

Fig.3 Distribution of displacement direction and orientation of the armyworm migrating at different altitudes（Aug.30，2001）

3 讨论

害虫迁飞不仅是其长期进化形成的一种适应环境的生存策略，而且更是迁飞害虫在较大范围内暴发成灾的重要因素。粘虫作为典型的迁飞害虫，其迁飞位移与风向关系问题一直是需要不断深入研究的重要课题之一。针对以往在昆虫飞行与气流关系研究方面的局限性，我们采用室内外观测相结合，尤其将直筒风洞与环形风洞、昆虫飞行磨以及雷达等不同仪器设备相结合，并通过改进悬吊测飞方法克服了以往固定方向测飞的弊端。室内的观测结果

表明，粘虫蛾对气流具有敏感的行为反应，而且对风向的感应能力较强，表现出迎风起飞和迎风飞行的行为特征。同时粘虫也能感应风速的大小，通过自行调整虫体方向来适应风速的变化；当风速小于昆虫自身飞行速度时，粘虫可逆风或侧逆风飞行；当风速过大（超过粘虫逆风飞行的极限）时，则采取头部迎风或侧迎风的姿态借助气流的一定推力侧风位移；这种行为可以减少能源的消耗而获得较大的移动距离，这可能是迁飞昆虫长期在气流场中飞行形成的一种特性。我们在直筒风洞中观测的粘虫飞行行为及其与气流的关系与赖凤香等（2000）的测试结果基本一致，但在逆风飞行能力上差异较大。这不仅进一步证明了粘虫成虫飞行与气流的关系及其具有逆风起飞和飞行的行为特征，而且初步明确了粘虫在气流场中实际位移与风向及风速的关系、逆风飞行时虫体方向与气流方向的关系。

粘虫具有较强的飞行能力（张志涛和李光博，1985；曹雅忠等，1991，1995；罗礼智等，1995，1996），可逆风飞行的最大风速为 7.2 m/s；粘虫是典型的夜行性昆虫，其飞行活动均在夜间，而夜间气流垂直运动的速度一般小于粘虫逆风飞行能力，因此，粘虫在迁飞时可以自主地起飞和降落。粘虫起飞升空后，由于高空的风速一般超过粘虫逆风飞行的极限，因此，粘虫可自行调整虫体方向，与气流方向成一定的夹角（其头部朝向为侧迎风）进行远距离迁飞，迁飞位移的大方向与气流方向是基本一致的，其实际位移距离应是昆虫飞行位移与气流位移的矢量和。

从雷达观测结果来看，粘虫在空中具有成层迁飞的现象，而且主要在两高速风层之间的转换区成层。由于昆虫迁飞运行是在一个风、温和湿复杂且变化的系统中完成的，因此，粘虫的迁飞成层直接与风速有关。观测结果表明，在三个密度集聚层的气流速度均较小；而风速低有利于粘虫调整虫体方向使其与气流形成一个适宜的角度。另外，粘虫飞行活动有其适宜的温度和湿度范围（张志涛和李光博，1985；曹雅忠等，1995a），成层现象除与风速关系密切之外，还与粘虫的适宜飞行温度或湿度有关，例如在三个密度集聚层的气温均处在粘虫飞行活动的最适温区（15～25℃）。在雷达观测中还发现，粘虫表现出秋季回迁的强烈定向行为，即基本朝着 SSW 方向迁移。这一现象可能与粘虫在我国北方不能越冬等生物学特性、季节性发生危害规律以及我国秋季典型的由北向南方向的季风气候有关，而且与粘虫季节性迁飞标记回收试验结果（李光博等，1964）相符，但其行为机制还有待进一步深入研究。

参　考　文　献（References）

Cao Y Z, Cheng D F, Ni H X, Li G B, 1991. Effects of supplement carbohydrate sources on the flight ability of oriental armyworm. China Society of Plant Protection. In: Dissertations of Technological Researcher on Plant Protection on the International Conference. Beijing: China Science & Technology Press. 422－427. ［曹雅忠，程登发，倪汉祥，李光博，1991. 补充营养对粘虫飞翔力效应的研究. 中国植物保护学会编. 见：首届全国中青年植物保护科技工作者学术讨论会论文集. 北京：中国科学技术出版社. 422－427］

Cao Y Z, Huang K, Li G B, 1995a. The effect of relative humidity on flight activity of adult oriental armyworm. *Acta Phytophylacica Sinica*, 22 (2): 134－138. ［曹雅忠，黄葵，李光博，1995a. 空气相对湿度对粘虫飞翔活动的影响. 植物保护学报，22（2）：134－138］

Cao Y Z, Li G B, Hu Y, 1997. Effect of photoperiod on reproduction and flight of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecol. Sin.*, 17 (4): 402－406. ［曹雅忠，李光博，胡毅，1997. 光周期对粘虫生殖与飞翔影响的初步研究. 生态学报，17（4）：402－406］

Cao Y Z, Luo L Z, Guo J, 1996. Performance of adult reproduction and flight in relation to larval nutrition in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*, 39 (1): 105－108. ［曹雅忠，罗礼智，郭军，1996. 粘虫生殖和飞翔与幼虫期营养的关系. 昆虫学报，39（1）：105－108］

Cao Y Z, Luo L Z, Li G B, Hu Y, 1995b. The relationship between utilization of energy materials and sustained flight in the moths of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*, 38 (3): 290－295. ［曹雅忠，罗礼智，李光博，胡毅，1995b. 粘虫飞翔能源物质及其消耗. 昆虫学报，38（3）：290－295］

Chen R L, Bao X Z, Drake V A, Farrow R A, Wang S Y, Sun Y J, Zhai B P, 1989. Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecol. Entomol.*, 14, 149－162.

Chen R L, Bao X Z, Wang S Y, Sun Y J, Li L Q, Liu J R, 1988. A radar equipment for entomological observation and its test. *Acta Ecol. Sin.*, 8 (2): 176－182. ［陈瑞鹿，暴祥致，王素云，孙雅杰，李立群，刘继荣，1988. 应用昆虫雷达检测昆虫的研究. 生态学报，8（2）：176－182］

Cheng D F, Wu K M, Tian Z, Wen L P, Shen Z R, 2002. Acquisition and analysis of migration data from the digitised display of a scanning entomological radar. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35: 63－75.

Drake V A, 1981. Quantitative observation and analysis procedures for a manually operated entomological radar. Technical Paper, Division of Entomology, CSIRO, Australia. No. 19.

Drake V A, 1982. The CSIRO entomological radar: A remote sensing instrument for insect migration research. In: Wisbey L A ed. The Scientific Instrument for Primary Production. 63－73.

Lai F X，Chen W，Yao Q，Zhang Z T，2000. Flight behavior of the moths of *Mythimna separata* (Walker) in wind tunnel. *Entomol. Knowledge*，37 (4)：193－194. [赖凤香，陈伟，姚青，张志涛，2000. 风洞内粘虫飞翔行为与气流的关系. 昆虫知识，37 (4)：193－194]

Li G B，Wang H X，Hu W X，1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three-year result of releasing and recapturing of marked moths. *Acta Phytophylacica Sinica*，3 (2)：101－109. [李光博，王恒祥，胡文绣，1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. 植物保护学报，3 (2)：101－109]

Li K B，Luo L Z，Cao Y Z，Hu Y，2001. Study on the relationship between degenerating flight muscle and reproduction in the oriental armyworm，*Mythimna separata* (Walker). *Chinese Science Abstracts*，7 (5)：662－664. [李克斌，罗礼智，曹雅忠，胡毅，2001. 粘虫飞行肌降解与生殖关系的初步研究. 中国学术期刊文摘（科技快报），7 (5)：662－664]

Luo L Z，1998. The primary advance of research in mechanism of migration behavior of oriental armyworm，*Mythimna separata* (Walker). China Society of Plant Protection，Institute of Plant Protection，Chinese Academy of Agricultural Sciences and State key laboratory for biology of plant disease and insect pests. In：Prospect of Plant Protection in the 21th Century. Beijing：China Science & Technology Press. 30－35. [罗礼智，1998. 我国粘虫迁飞行为机制研究的主要进展. 中国植物保护学会，中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室合编，见：植物保护 21 世纪展望. 北京：中国科学技术出版社. 30－35]

Luo L Z，Jiang X F，Li K B，Hu Y，1999. Influences of fight on reproduction and longevity of the oriental armyworm，*Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*，42 (2)：150－158. [罗礼智，江幸福，李克斌，胡毅，1999. 粘虫飞行对生殖及寿命的影响. 昆虫学报，42 (2)：150－158]

Luo L Z，Li G B，Cao Y Z，Hu Y，1995a. The influence of larval rearing density on flight capacity and fecundity of adult oriental armyworm，*Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*，38 (1)：38－45. [罗礼智，李光博，曹雅忠，胡毅，1995a. 粘虫幼虫密度对成虫飞行与生殖的影响. 昆虫学报，38 (1)：38－45]

Luo L Z，Li G B，Hu Y，1995b. Relationship between flight capacity and oviposition of oriental armyworm moths，*Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*，38 (3)：284－289. [罗礼智，李光博，胡毅，1995b. 粘虫飞行与产卵的关系. 昆虫学报，38 (3)：284－289]

Luo L Z，Li G B，Cao Y Z，Hu Y，1996. An ultrastructural study on the development of flight muscle in adult oriental armyworm，*Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*，39 (4)：366－374. [罗礼智，李光博，曹雅忠，胡毅，1996. 粘虫蛾飞行肌的发育：超微结构特征分析. 昆虫学报，39 (4)：366－374]

Riley J R，1979. Radar as an aid to the study of insect flight. In：Amalner C J and Macdanolk D W eds. A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking. 131－140.

Riley J R，Reynolds D R，Farmery M J，1983. Observations on the flight behaviour of the armyworm，*Spodoptera exempta* at an emergence site using radar and infrared optical techniques. *Ecol. Entomol.*，8：395－418.

Schaefer G W，1976. Radar observation of insect flight. In：Rainey R C ed. Symposia of the Royal Ent. Soc. Lond. No. 7：157－179.

Zhang Z T，Li G B，1985. A study on the biological characteristics of the flight of the oriental armyworm [*Mythimna separata* (Walker)] moth. *Acta Phytophylacica Sinica*，12 (2)：93－100. [张志涛，李光博，1985. 粘虫飞翔生物学特性初步研究. 植物保护学报，12 (2)：93－100]